

**Control no lineal de un almacenador de energía por  
superconducción para el soporte de potencia activa y reactiva  
en sistemas de distribución**

Daniela Loaiza Orozco

Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar al título de  
**Ingeniera Electricista**

Director

M.Sc. Oscar Danilo Montoya

Co-Directores

Ph.D. Alejandro Garcés Ruiz

M.Sc. Walter Gil González

Pereira, 19 de noviembre de 2018  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
Programa de Ingeniería Eléctrica



## Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

M.Sc. Oscar Danilo Montoya. Director

---

Ph.D. Alejandro Garcés Ruiz. Co-Director

---

M.Sc. Walter Gil González. Co-Director

---

Jurado

Pereira, 19 de noviembre de 2018

Control no lineal de un almacenador de energía por superconducción para el soporte de potencia activa y reactiva en sistemas de distribución  
©Daniela Loaiza Orozco

Pereira, 19 de noviembre de 2018  
Programa de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Carrera 27 No 10-02 Barrio Alamos - Risaralda - Colombia  
TEL: (+57)(6)3137122

*[www.utp.edu.co](http://www.utp.edu.co)*

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/index.html>*

# Dedicatoria

Este logro se lo dedico con todo mi amor y cariño a mi familia porque gracias a sus valores y principios me ayudaron hacer una mejor persona. Especialmente a mi mamá por ser mi amiga por enseñarme a ser siempre perseverante y cumplir con mis ideales; además agradezco a mis tías por ser mis cómplices.

A mi novio, por su amor porque con sus palabras de aliento no me dejaban decaer.

A todas esas personas que durante este tiempo estuvieron a mi lado apoyándome y logrando que este sueño se haga realidad.

# Agradecimientos

Quiero agradecerle a Dios que me inspira, guía y anima cada nuevo día.

A mi familia, quienes mantuvieron su confianza, paciencia y amor, y además valoraron mi esfuerzo en todo momento, gracias a su constante enseñanza me llevaron a ser inquebrantable en este proceso.

A la Universidad Tecnología de Pereira, por brindarme las herramientas para mi desarrollo profesional, y así cumplir mi sueño como Ingeniera Electricista.

A los docentes, Oscar Danilo Montoya y Walter Gil González por ser mis guías en este culminar, quienes me brindaron sus consejos y aportes para fortalecer mi proceso académico y personal.

# Resumen

Partiendo de la necesidad de desarrollar e implementar nuevas tecnologías a nivel mundial que protejan el medio ambiente y con la idea de mantener la vanguardia de las Redes Eléctricas Inteligentes que cada vez llega a más lugares del mundo; se propone en este trabajo de grado el diseño y simulación de un control no lineal de un almacenador de energía por superconducción para el soporte de potencia activa y reactiva en sistemas de distribución.

En este documento, se presenta la integración de un sistema de almacenamiento de energía por superconducción (SMES), al sistema de distribución utilizando un convertidor por fuente de corriente modulado por ancho de pulso (PWM-CSC); se iniciara explicando el modelo matemático del convertidor en el cual se utilizó un modelo promediado que considera los índices de modulación como entradas de control, además una formulación Hamiltoniana se selecciona para diseñar el control de lazo cerrado utilizando marco de referencia  $\alpha\beta$ . La metodología propuesta se evalúa con control proporcional-integral basado en pasividad (PI-PBC) que garantiza estabilidad de manera asintótica en el sentido de Lyapunov para el sistema dinámico operando en lazo cerrado.

Por ultimo se realizan las simulaciones empleando el software MATLAB/SIMULINK, donde se plantean tres escenarios de prueba que permiten corroborar numéricamente la aplicabilidad y eficiencia del controlador propuesto.

# Índice general

Resumen	III
Índice general	V
Índice de tablas	VI
Índice de figuras	VII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2. Justificación . . . . .	4
1.3. Objetivos . . . . .	5
1.3.1. Objetivo general . . . . .	5
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	5
1.4. Estado del arte . . . . .	6
1.5. Organización del documento . . . . .	7
<b>2. Modelo del convertidor</b>	<b>8</b>
2.1. Sistema . . . . .	8
2.2. Modelo matemático . . . . .	9
2.2.1. Transformada de Clarke . . . . .	10
2.2.2. Formulación Hamiltoniana . . . . .	10
<b>3. Técnica de control</b>	<b>12</b>
3.1. Descripción de la técnica de control . . . . .	12
3.2. Diseño del controlador . . . . .	14
3.3. Selección de las señales de referencia . . . . .	15
3.3.1. Tensiones de la red ( $v_{\alpha\beta}^*$ ) . . . . .	15

3.3.2.	Corriente del superconductor ( $i_{dc}^*$ ) . . . . .	15
3.3.3.	Corriente de la red ( $i_{\alpha\beta}^*$ ) . . . . .	15
<b>4.</b>	<b>Aplicación y Resultados</b>	<b>18</b>
4.1.	Escenarios de simulación . . . . .	18
4.1.1.	Escenario I . . . . .	19
4.1.2.	Escenario II . . . . .	24
4.1.3.	Escenario III . . . . .	28
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>32</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>34</b>



# Índice de tablas

4.1. Parámetros del controlador . . . . .	19
4.2. Parámetros del transformador y la red . . . . .	19
4.3. Parámetros de potencia activa y reactiva de referencia . . . . .	20
4.4. Parámetros de desequilibrio . . . . .	24

# Índice de figuras

1.1. Conexión típica de una bobina superconductora a la red eléctrica mediante un convertidor por fuente de corriente . . . . .	3
2.1. Conexión SMES utilizando un PWM-CSC . . . . .	8
3.1. Esquema de controlador propuesto. . . . .	16
4.1. Corriente del superconductor . . . . .	20
4.2. Corrientes del sistema . . . . .	21
4.3. Respuesta dinámica del control de potencia activa y reactiva en el sistema SMES bajo condiciones de equilibrio . . . . .	22
4.4. Índices de modulación $ma$ , $mb$ y $mc$ . . . . .	23
4.5. Corriente superconductor . . . . .	24
4.6. Corrientes del sistema . . . . .	25
4.7. Respuesta dinámica del control de potencia activa y reactiva en el sistema SMES bajo condiciones de desequilibrio . . . . .	26
4.8. Índices de modulación $ma$ , $mb$ y $mc$ en condiciones de desequilibrio . .	27
4.9. Sistema SMES propuesto con un generador eólico . . . . .	28
4.10. Corriente del superconductor . . . . .	29
4.11. Corriente de la red . . . . .	29
4.12. Curva de generación de la potencia activa y el consumo de potencia reactiva activa del SMES . . . . .	30
4.13. Índices de modulación . . . . .	31

# Capítulo 1

## Introducción

El desarrollo sustentable y amigable con el medio ambiente es un tema cada vez más importante en todo ámbito de la sociedad humana. En los últimos años ha sido evidente que nuestro planeta es muy vulnerable al cambio climático y que eventos meteorológicos como El Niño y La Niña se intensifican cada vez más; esto obliga a tener redes inteligentes que permitan el uso de la energía eléctrica de forma más eficiente, que ayuden a la reducción paulatina de los gases de efecto invernadero.

En las últimas décadas, los sistemas de almacenamiento de energía (EES) han comenzado a jugar un papel importante en la mejora de la respuesta dinámica del sistema de potencia. Los sistemas de almacenamiento de energía son una herramienta tecnológica eficiente para la integración masiva de energías renovables y reducir la variabilidad de sus recursos energéticos primarios.

En particular, el almacenamiento de energía magnética es logrado induciendo una corriente continua en una bobina que se convierte superconductor mediante el uso de temperaturas muy bajas  $-270^{\circ}\text{C}$  [1, 2]. La corriente en un SMES aumenta al cargar y disminuye durante la descarga. Las ventajas más importantes de un SMES incluyen [1, 3]:

- Alta eficiencia (superior al 95 %) debido a la baja resistencia de la bobina.
- Baja degradación en los ciclos de carga cargada.
- Capacidad de control bidireccional.

- Capacidad de control de potencia activa y reactiva independiente.

Estas características permiten que los SMES se implementen en aplicaciones tales como: aumentar la capacidad de transmisión de energía, mejorando la estabilidad de frecuencia y voltaje, y mejorando el rendimiento dinámico de los sistemas de potencia [3,4].

Los sistemas SMES requieren estrategias de control robustas y rápidas, así como un diseño adecuado de convertidores electrónicos potencia para integrarse a la red eléctrica. Esto puede ser un convertidor de línea conmutada (LCC) o un convertidor conmutado forzado como los convertidores de fuente de corriente modulados por ancho de pulso (PWM-CSC) o convertidores controlados por voltaje (VSC). Debido a las características inherentes de la bobina superconductora, es más natural usar un PWM-CSC para conectar un SMES a la red eléctrica, ya que permite el control directo de corriente en la bobina [5].

Se pueden encontrar múltiples estrategias para controlar los sistemas SMES, tales como, el control lineal por realimentación de variables de estado o con desigualdades lineales matriciales [6], controladores proporcionales-integrales [7], además se han propuesto esquemas de control basado en pasividad para sistemas SMES empleando el marco de referencia  $dq0$  como se presenta en [8].

Según la revisión anterior, en este trabajo se propone un control no lineal para la transferencia de potencia activa y reactiva de un sistema SMES integrado con un PWM-CSC para aplicaciones de generación distribuida en el marco de referencia  $\alpha\beta0$  sin la necesidad de emplear sistemas de medición de frecuencia y ángulo de fase y todas las simulaciones son realizadas mediante el software MATLAB/SIMULINK

## 1.1. Planteamiento del problema

Los efectos generados por la emisión de gases de efecto invernadero están produciendo un cambio acelerado en las condiciones climáticas a nivel mundial. Prueba de ello es el aumento de nivel de mar producto de descongelamiento de los casquetes polares, así como intensos fenómenos de El Niño con sequías más prolongadas, así como grandes inundaciones por el fenómeno de La Niña en regiones donde nunca se habían presentado [9]. En este sentido existe una gran preocupación a nivel mundial por el desarrollo

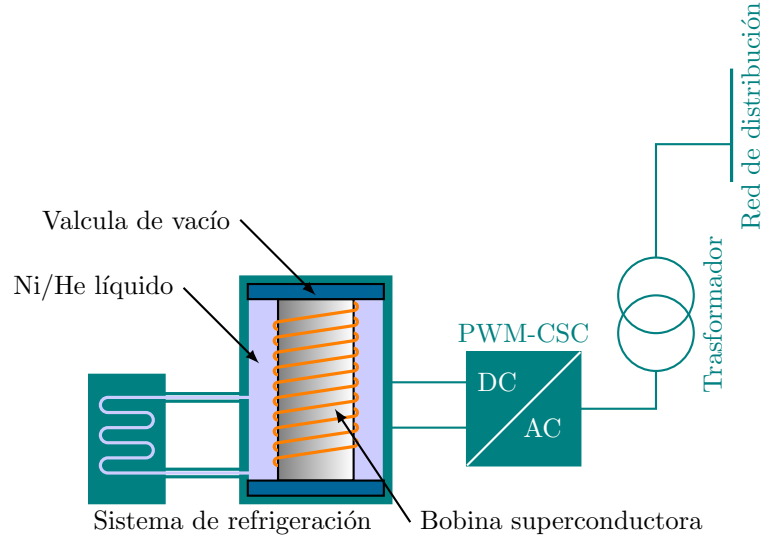


Figura 1.1: Conexión típica de una bobina superconductora a la red eléctrica mediante un convertidor por fuente de corriente

de nuevas tecnologías que ayuden a mitigar este gran problema; de acuerdo con esto, los almacenadores de energía han tenido un impulso importante y se han convertido en elementos atractivos para inversión en sistemas de potencia, ya que son aliados fundamentales de la generación distribuida con fuentes de energía renovable, puesto que permiten suavizar la curva de demanda [10].

Aunque existen diversos sistemas de almacenamiento de la energía, en este trabajo se estudiará el sistema de almacenamiento de energía por superconducción, conocido por sus siglas en inglés como SMES (superconducting Magnetic Energy Storage), este tipo de almacenamiento utiliza una bobina superconductora que almacena energía en forma de campo magnético. La bobina conductora se enfría a niveles cercanos al cero absoluto para reducir al máximo las pérdidas del efecto joule [11]; bajo estas condiciones el sistema SMES es eficiente y permite responder a los cambios abruptos de demanda en tiempos muy cortos [2]. El esquema general de un SMES conectado a la red a través de un convertidor DC/AC se presenta en la figura 1.1.

Para el acoplamiento entre el sistema de potencia y el sistema de almacenamiento es necesario emplear convertidores electrónicos de potencia de tipo DC/AC que pueden producir flujos de potencia bidireccionales, es decir convertidores que permiten modi-

ficar una señal de naturaleza alterna (señal en el sistema de potencia) y presentarla como una señal de naturaleza continua (señal deseada en el sistema de almacenamiento de energía por superconducción), o viceversa. Con el fin de mejorar las características operativas del sistema eléctrico de potencia mediante el intercambio controlado de potencia activa y reactiva entre el sistema de almacenamiento de energía y la red eléctrica.

Hoy en día existen diferentes tipos de convertidores de potencia, como son el convertidor de fuente de tensión o VSC (Voltage Source Converter), el convertidor de conmutación de línea o LCC (Line commutated Converter), el convertidor de fuente de corriente con modulación por ancho de pulso o PWM-CSC (Pulse-Width Modulated Current Source Converter) [2].

En este trabajo se estudiará el convertidor de fuente de corriente PWM-CSC para la integración de un SMES a una red eléctrica trifásica. Es seleccionado el PWM-CSC debido a que este tipo de convertidor gestiona directamente la corriente que fluye en la bobina superconductora. Esta característica es fundamental en los sistemas SMES porque estos dispositivos almacenan energía en su campo magnético en forma de corriente [1, 3].

Los sistemas de almacenamiento por superconducción han sido explorados ampliamente en sistemas eléctricos de potencia en niveles de transmisión y subtransmisión para mejorar problemas de estabilidad de frecuencia [3]; sin embargo, en redes de distribución este dispositivo no ha sido poco utilizado en aplicaciones de soporte de potencia activa y reactiva [12, 13]. Por lo cual, este proyecto pretende analizar las ventajas de este dispositivo para cumplir dicho propósito desde la perspectiva del control no lineal [10].

## 1.2. Justificación

El equilibrio de la carga se ha manejado principalmente a través de combustibles fósiles, hoy en día sabemos que este tipo de generación esta dañando notablemente el medio ambiente, por lo tanto el uso de nuevas fuentes de energía renovables son una gran estrategia para ayudar a esta gran problemática que compromete indudablemente la sostenibilidad del mundo que conocemos y habitamos [14]. Sin embargo, la mayoría de estas fuentes de energía renovables son intermitentes en su naturaleza, presenta un gran reto en la generación de energía y en el balance de carga requiriendo un mayor mantenimiento para asegurar la estabilidad y confiabilidad de la red eléctrica [1].

En el mundo se han hecho grandes esfuerzos en la búsqueda de soluciones viables para mitigar los problemas que trae las nuevas fuentes de energía renovable, una de las soluciones más importante ha sido el almacenamiento de la energía ya que permite aumentar la flexibilidad y la uniformidad del flujo energético, y así reducir la intermitencia que suelen presentar las tecnologías de generación renovables [10]. Al mismo tiempo, estas tecnologías necesitan convertidores electrónicos de potencia para conectarse a la corriente alterna [15]; aunque hoy en día existen muchos tipos de convertidores, dependiendo de la aplicación que se requiera implementar, es necesario escoger la tecnología de conversión más adecuada [10]. Por lo anterior, con la realización de este trabajo se pretende desarrollar un sistema de control no lineal para un SMES conectado con un PWM-CSC como mejor alternativa para su conexión, la cual permitirá la gestión eficiente de la potencia activa y reactiva en sistemas de distribución desde el punto de vista dinámico.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Implementar un sistema de control no lineal para una SMES conectado a un convertidor PWM-CSC para controlar potencia activa y reactiva en sistemas de distribución.

### 1.3.2. Objetivos específicos

1. Revisar la literatura reciente sobre el almacenamiento de la energía por superconducción y los convertidores controlados por fuente de corriente.
2. Estudiar el modelo dinámico del SMES conectado con un PWM-CSC.
3. Seleccionar e implementar la técnica de control no lineal que mejor se adapte al modelo dinámico del almacenador de energía.
4. Validar la estrategia de control utilizada mediante software de simulación.
5. Realizar el análisis de los resultados obtenidos y compararlos con una técnica clásica de control.
6. Redactar el documento final.

## 1.4. Estado del arte

Hoy en día, la energía eléctrica representa el 12 % de la energía procesada por la humanidad, proporción que se espera que crezca en los próximos años (34 % previsto para 2025) en un contexto de combustibles fósiles decrecientes, y un mayor respeto por el medio ambiente; la producción de electricidad descentralizada y el rápido crecimiento de fuentes variables y fluctuantes (energía renovable: solar, turbinas eólicas, etc.) aumentan la dificultad de estabilizar la red eléctrica, principalmente debido a un desequilibrio entre oferta y demanda. Por lo tanto, es conveniente generar la energía, transmitirla, convertirla y luego almacenarla en caso de ser necesario. En este momento, el almacenamiento de energía eléctrica se ha convertido en una necesidad imperante en la realidad de los sistemas eléctricos modernos [4].

Una de las formas de almacenamiento mas prometedoras es el almacenamiento de energía por superconducción (SMES) el cual almacena energía eléctrica en el campo magnético generado por la corriente directa en la bobina superconductora que ha sido enfriada criogénicamente a una temperatura por debajo de su temperatura crítica superconductora (ver Figura 1). En general, cuando la corriente pasa a través de una bobina, la energía eléctrica se disipa como calor debido a la resistencia del alambre; sin embargo, si la bobina está hecha de un material superconductor, tal como mercurio o vanadio, bajo su estado superconductor (normalmente a una temperatura muy baja), se produce resistencia cero y la energía eléctrica puede almacenarse con pérdidas mínimas [1].

Debido a su naturaleza superconductora, la energía se puede almacenar durante un largo periodo de tiempo sin fugas y puede entonces utilizarse para inyectar potencia activa en la red siempre que haya una perturbación. La principal ventaja de la bobina SMES es que puede descargar grandes cantidades de potencia nominal durante un corto período de tiempo. Se puede realizar un número ilimitado de ciclos de carga y descarga [5].

Existen varias investigaciones con respecto a las SMES como [3] y [16] las cuales nos muestran los avances y estudios relacionado con esta gran fuente de almacenamiento.

Los autores de [6] presentan un control de realimentación de estado vía desigualdades de matriz lineal; aplicando este control a los SMES para integrar con la red mediante PWM-CSC que permite el control potencia activa y reactiva, demostrando



una respuesta dinámica rápida que es adecuada para los requisitos de las aplicaciones de estabilidad del sistema eléctrico.

Luego para este mismo año los mismos autores presentan una generalización este control para sistemas de almacenamiento de energía eléctrica mediante supercapacitores y superconductores; para diseñar este esquema de control una formulación Hamiltoniana y un control basado en pasividad es empleado [17].

En [18] se propone un controlador bilineal proporcional-integral (PI) basado en formulaciones basadas en pasividad para integrar sistemas SMES en redes trifásicas. Se realiza una conexión en cascada entre un convertidor del tipo DC-DC y un VSC.

Los autores [2] y [8] presentan un control de potencia activa y reactiva no lineal para un SMES conectado en redes de distribución trifásicas mediante PWM-CSC. La teoría del control basado en la pasividad (PBC) se selecciona como una técnica de control no lineal, ya que el modelo dinámico de bucle abierto presenta una estructura Hamiltoniano de puertos (pH). La teoría de PBC explota la estructura pH del sistema dinámico de bucle abierto para diseñar una ley de control general, que preserva la estructura pasiva en bucle cerrado a través de la interconexión y la reasignación de amortiguamiento. Es importante resaltar que estos trabajos son de gran importancia para el desarrollo de este trabajo de grado.

A diferencia de los trabajos anteriores en este proyecto se propone un control no lineal para un SMES conectado con un PWM-CSC para controlar potencia activa y reactiva de manera independiente en sistemas de distribución de naturaleza trifásica.

## 1.5. Organización del documento

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presenta la descripción y el modelo matemático del convertidor DC/AC, adicionalmente se representa el modelo de la forma Hamiltoniana. En el capítulo 3 se presenta la técnica de control propuesta para la solución del problema planteado. En el capítulo 4 se presenta el sistema de prueba desarrollado en el software SIMULINK/MATLAB en el cual se puede evaluar el desempeño de la estrategia de control basada en pasividad y observar que se alcanza la estabilidad del sistema en los puntos deseados. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas a partir de este trabajo y las propuestas sobre trabajos futuros relacionados al tema. Finalmente se encuentran las referencias bibliográficas.

## Capítulo 2

### Modelo del convertidor

El objetivo principal de este capítulo es presentar la formulación matemática para el sistema SMES bajo el concepto de estructura Hamiltoniana, lo cual permitirá explotar la estructura pasiva del sistema para formular una esquema de control que garantice estabilidad en lazo cerrado en el sentido de Lyapunov.

#### 2.1. Sistema

Para interconectar la bobina superconductora a la red eléctrica trifásica se emplea un PWM-CSC y un filtro resistivo-inductivo serie (transformador), en conjunto con un banco trifásico de condensadores para filtrar los armónicos de alto orden producidos por la conmutación, como se puede ver en la Fig. 2.1.

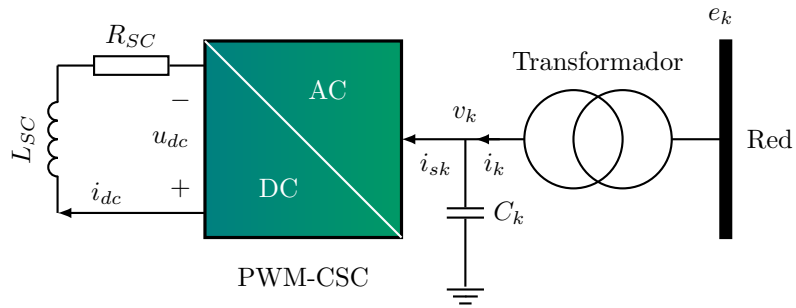


Figura 2.1: Conexión SMES utilizando un PWM-CSC

## 2.2. Modelo matemático

Para obtener el modelo matemático que describe la dinámica del sistema se hace uso de las leyes de kirchhoff se aplica en ambos lados del convertidor como se indica en (2.1) usando el marco de referencia  $abc$ .

$$\begin{aligned} C_k \frac{d}{dt} v_k &= i_{sk} - i_k \\ L_k \frac{d}{dt} i_k &= -R_k i_k + v_k - e_k \quad \{\forall k \in (a, b, c)\} \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde  $C_k$  es el valor del banco de condensadores,  $L_k$  y  $R_k$  son el valor de inductancia y resistencia de cada fase del transformador, respectivamente.  $i_k$  es la corriente del lado secundario del transformador,  $i_{sk}$  es la corriente de salida del PWM-CSC,  $e_k$  es la tensión de fuente equivalente asociada con la red eléctrica,  $v_k$  es la tensión de salida del PWM-CSC.

La corriente de salida del PWM-CSC ( $i_{sk}$ ) es el resultado de modulación de la corriente de la bobina superconductora. Puede ser expresado de acuerdo con (2.2).

$$i_{sk} = m_k i_{dc} \quad \{\forall k \in (a, b, c)\} \quad (2.2)$$

donde  $m_k$  es el índice de modulación de la fase  $k$ , que es la señal de control y está limitado entre -1 y 1 para evitar sobremodulación en el PWM-CSC.

Con el fin de controlar la transferencia de potencia en ambos lados del convertidor, se presenta la relación (2.3).

$$\begin{aligned} P_{dc} &= i_{sc} L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} \\ P_{ac} &= m_k i_{dc} v_k \end{aligned} \quad (2.3)$$

Si se considera que el sistema es ideal (sin pérdidas), entonces

$$\begin{aligned} P_{dc} + P_{ac} &= 0 \\ i_{sc} L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} &= -m_k i_{dc} v_k \end{aligned} \quad (2.4)$$

Además, si

$$i_{sc} = i_{dc} \quad (2.5)$$

Entonces:

$$L_{sc} \frac{di_{dc}}{dt} = -m_k v_k \quad (2.6)$$

### 2.2.1. Transformada de Clarke

La transformación de Clarke invariante en el tiempo se usa para transformar las expresiones (2.1), (2.2) y (2.6) desde el marco de referencia  $abc$  hacia el marco de referencia de  $\alpha\beta$ ; para esto se tiene en cuenta la matriz de transformación (2.7)

$$[T_{\alpha\beta}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Después de algunas sustituciones, el sistema dinámico resultante es definido por (2.8)

$$\begin{aligned} C_\alpha \frac{d}{dt} v_\alpha &= -i_\alpha + m_\alpha i_{dc} \\ C_\beta \frac{d}{dt} v_\beta &= -i_\beta + m_\beta i_{dc} \\ L_\alpha \frac{d}{dt} i_\alpha &= -R_\alpha i_\alpha + v_\alpha - e_\alpha \\ L_\beta \frac{d}{dt} i_\beta &= -R_\beta i_\beta + v_\beta - e_\beta \\ L_{sc} \frac{d}{dt} i_{dc} &= -(m_\alpha i_\alpha + m_\beta i_\beta) \end{aligned} \quad (2.8)$$

### 2.2.2. Formulación Hamiltoniana

El Hamiltoniano puede ser considerado como la función que representa la energía total almacenada del sistema, obtenida al sumar las energías almacenadas en todos condensadores en inductores del sistema [19].

$$H(x) = \frac{1}{2} (L_\alpha i_\alpha^2 + L_\beta i_\beta^2) + \frac{1}{2} (C_\alpha v_\alpha^2 + C_\beta v_\beta^2) + \frac{1}{2} L_{sc} i_{dc}^2; \quad (2.9)$$

$$x = \nabla H(x) \quad (2.10)$$

Con el fin de diseñar un control basado en pasividad, la dinámica del sistema puede ser representada mediante un modelo pH como sigue

$$D\dot{x} = \left( J_0 + \sum_{i=1}^2 J_i u_i - R \right) x + \xi \quad (2.11)$$

dónde  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $J(x)$  es la matriz de interconexión del sistema tal que  $J(x) = -J^T(x)$  (es decir, es una matriz anti-simétrica),  $R(x)$  en conocido como una matriz de disipación tal que  $R(x) \succeq 0$ ,  $D$  es la matriz de inercia,  $\xi$  corresponde a una perturbación independiente de las variables de estado y finalmente  $u$  representa las señales de control, i.e.,  $(m_\alpha$  y  $m_\beta)$  [20].

$$\begin{aligned} J_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, J_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\ D &= \begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{sc} \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ v_\alpha \\ v_\beta \\ i_{dc} \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} -e_\alpha \\ -e_\beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ u &= \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_\alpha \\ m_\beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.12)$$

## Capítulo 3

# Técnica de control

En este capítulo se describe la técnica de control para el intercambio de potencia activa y reactiva utilizando un control de PI basado en pasividad (PI-PBC). Para el sistema propuesto en el capítulo 2. Se selecciona esta estrategia, dado que el sistema dinámico de circuito abierto conserva la estructura de pH lo que simplifica el diseño de control garantizando la estabilidad del sistema de circuito cerrado en todo el espacio de operación [8] .

### 3.1. Descripción de la técnica de control

Se propone diseñar una ley de control  $u$ , con un vector de referencia se convierta en un nuevo punto de estabilidad del sistema. Donde la dinámica desea del sistema este definida por la ecuación (3.1).

$$D\dot{x}^* = \left( J_0 + \sum_{i=1}^2 J_i u_i^* - R \right) x^* + \xi \quad (3.1)$$

Las señales de error son:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x - x^* \\ \bar{u} &= u - u^* \end{aligned} \quad (3.2)$$

Reemplazando (3.2) en (2.11) se tiene

$$\begin{aligned}
D(\dot{\bar{x}} + \dot{x}^*) &= (J_o + J_1(\bar{u} + u^*) + J_2(\bar{u} + u^*) - R)(\bar{x} + x^*) + \xi \\
D\dot{\bar{x}} + D\dot{x}^* &= (J_o + J_1\bar{u} + J_1u^* + J_2\bar{u} + J_2u^* - R)\bar{x} \\
&\quad + (J_o + J_1\bar{u} + J_1u^* + J_2\bar{u} + J_2u^* - R)x^* + \xi
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Restando (3.1) y (3.3) se obtiene:

$$D\dot{\bar{x}} = (J_o + J_1\bar{u} + J_1u^* + J_2\bar{u} + J_2u^* - R)\bar{x} + (J_1\bar{u} + J_2\bar{u})x^* \tag{3.4}$$

Proponiendo la siguiente función de Lyapunov (3.5):

$$V(\bar{x}) = \frac{1}{2}\bar{x}^T D\bar{x} > 0, \tag{3.5}$$

y su derivada (3.6):

$$\dot{V}(\bar{x}) = \bar{x}^T D\dot{\bar{x}} < 0 \tag{3.6}$$

Reemplazando (3.4) en (3.6)

$$\begin{aligned}
\dot{V}(\bar{x}) &= \bar{x}^T [(J_o + J_1\bar{u} + J_1u^* + J_2\bar{u} + J_2u^* - R)\bar{x} + (J_1\bar{u} + J_2\bar{u})x^*] \\
\dot{V}(\bar{x}) &= \bar{x}^T [J_o + J_1(\bar{u} + u^*) + J_2(\bar{u} + u^*)]\bar{x} - \bar{x}^T R\bar{x} + \bar{x}^T (J_1\bar{u} + J_2\bar{u})x^*
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Resolviendo la ecuación (3.7) se obtiene:

$$\dot{V}(\bar{x}) = -\bar{x}^T R\bar{x} + \bar{x}^T (J_1\bar{u} + J_2\bar{u})x^* \leq \bar{x}^T (J_1\bar{u} + J_2\bar{u})x^* \tag{3.8}$$

$$\dot{V}(\bar{x}) \leq \bar{x}^T \sum_{i=1}^2 (J_i u_i^*) x^* \tag{3.9}$$

Donde,

$$\begin{aligned}
\bar{y}^T &= \bar{x}^T J_1 J_2 x^* \\
\dot{z} &= -\bar{y} \\
\bar{u} &= -K_p \bar{y} + K_i \dot{z}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

si

$$\begin{aligned} K_p &= K_p^T \geq 0 \\ K_i &= K_i^T \geq 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

### 3.2. Diseño del controlador

La señal moduladora para el convertidor esta dada por:

$$m = \bar{m} + m^* \quad (3.12)$$

Las señal de control que permite minimizar el error ( $\bar{m}$ ) se puede obtener (3.10) como se muestra:

$$\bar{y}^T = \begin{bmatrix} \bar{y}_1^T \\ \bar{y}_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}^T J_1 x^* \\ \bar{x}^T J_2 x^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dc}^* v_\alpha - i_{dc} v_\alpha^* \\ i_{dc} v_\beta^* - i_{dc}^* v_\beta \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

por lo tanto,

$$\bar{m} = -kp \cdot \begin{bmatrix} i_{dc}^* v_\alpha - i_{dc} v_\alpha^* & -i_{dc} v_\beta^* + i_{dc}^* v_\beta \end{bmatrix} + ki \cdot \begin{bmatrix} -i_{dc}^* v_\alpha + i_{dc} v_\alpha^* & i_{dc} v_\beta^* - i_{dc}^* v_\beta \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Partiendo de (3.9) se puede obtener las ley de control para el sistema como se muestra:

$$\begin{aligned} m_\alpha^* &= \frac{i_\alpha^* + C \frac{d}{dt} v_\alpha^*}{i_{dc}^*} \\ m_\beta^* &= \frac{i_\beta^* + C \frac{d}{dt} v_\beta^*}{i_{dc}^*} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Nótese que (3.15) queda expresada en términos de la corriente y tensión de la red; dividido por la corriente del superconductor.



### 3.3. Selección de las señales de referencia

#### 3.3.1. Tensiones de la red ( $v_{\alpha\beta}^*$ )

Para obtener (3.16) se parte del modelo matemático descrito en el Capítulo 2 y utilizando (2.8), esto con el fin de que (3.15) quede expresado solo en términos de la corriente deseada de la red.

$$\begin{aligned} v_{\alpha}^* &= e_{\alpha} + Ldi_{\alpha}^* + Ri_{\alpha}^* \\ v_{\beta}^* &= e_{\beta} + Ldi_{\beta}^* + Ri_{\beta}^* \end{aligned} \quad (3.16)$$

#### 3.3.2. Corriente del superconductor ( $i_{dc}^*$ )

Igualmente que con  $v_{\alpha\beta}$  se despeja del modelo matemático presentando capítulo 2; es importante tener en cuenta que para lograr la implementación en tiempo real de (3.17) se requiere un filtro de paso alto.

$$i_{dc}^* = -\frac{1}{L_s} \int (m_{\alpha}^* v_{\alpha}^* - m_{\beta}^* v_{\beta}^*) \quad (3.17)$$

#### 3.3.3. Corriente de la red ( $i_{\alpha\beta}^*$ )

Teniendo en cuenta que la potencia activa y reactiva de la red se representa la siguiente manera:

$$\begin{aligned} P_{ac} &= v_{\alpha} i_{\alpha} + v_{\beta} i_{\beta} \\ Q_{ac} &= v_{\beta} i_{\alpha} - v_{\alpha} i_{\beta}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

y para los valores de referencia se tiene:

$$\begin{bmatrix} P_{ac}^* \\ Q_{ac}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{\alpha} & e_{\beta} \\ e_{\beta} & -e_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Despejando  $i_{\alpha}^*$  y  $i_{\beta}^*$  de (3.19) se tiene:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = -\frac{1}{e_{\alpha}^2 + e_{\beta}^2} \begin{bmatrix} -e_{\alpha} & -e_{\beta} \\ -e_{\beta} & e_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ac}^* \\ Q_{ac}^* \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

(3.20) permite controlar la potencia activa y reactiva del sistema SMES a la red de corriente alterna.

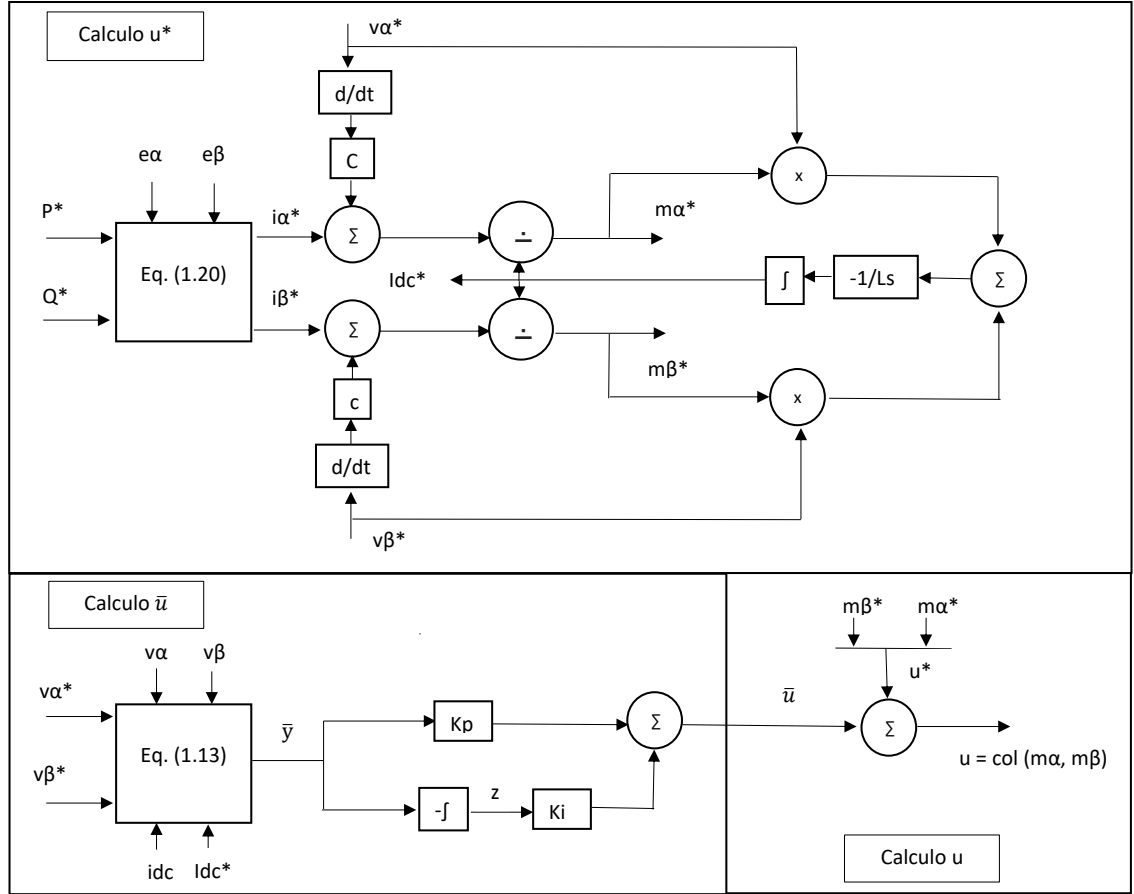


Figura 3.1: Esquema de controlador propuesto.

La figura 3.1 representa el diseño de la señal moduladora; inicialmente se muestra el calculo de la señal de referencia  $u^*$  (3.15) el cual tiene como entrada las señales de tensión de la red ( $v_{\alpha\beta}^*$ ), corriente de la red ( $i_{\alpha\beta}^*$ ) y la corriente del superconductor ( $i_{dc}^*$ ), en segundo lugar el calculo de  $\bar{u}$  (3.14) el cual nos permite minimizar el error por lo tanto tiene como señales de entrada los valores de la tensión ( $v_{\alpha\beta}, v_{\alpha\beta}^*$ ), la corriente del superconductor ( $i_{dc}, i_{dc}^*$ ) y las constantes ( $k_p, k_i$ ); donde al sumar  $u^* + \bar{u}$  nos da la

señal moduladora para el convertidor.

# Capítulo 4

## Aplicación y Resultados

En este capítulo se implementa la metodología propuesta en el Capítulo 3. Utilizando como herramienta computacional MATLAB / SIMULINK Para verificar y evaluar el desempeño del controlador.

### 4.1. Escenarios de simulación

Con el objetivo de verificar que el modelo matemático propuesto, se plantean tres escenarios de simulación:

- **Escenario I:** En este escenario se utilizara un sistema balanceado seleccionando una potencia activa y reactiva arbitra para verificar los puntos de ajuste activos y reactivos.
- **Escenario II:** En este escenario se seleccionara referencias arbitrarias para potencia activa y reactiva tal como en el Escenario I pero considerando un desequilibrio en cada fase del 10 %, donde se verificara los punto de ajustes activos y reactivos.
- **Escenario III:** Se considerara una fuente de energía renovable generador eólico conectada al sistema en cual el controlador inyectara toda la potencia activa disponible y compensar la máxima energía reactiva disponible.

Los parámetros del controlador y del sistema de prueba están dados en las Tablas 4.1 y 4.2. hay algunas consideraciones que se deben tener en cuenta:

Parámetro	valor
$K_{p1}$	1e-7
$K_{p2}$	1e-7
$K_{i1}$	0e-6
$K_{i2}$	0e-6

Tabla 4.1: Parámetros del controlador

Parámetro	valor
R	0.01 [ $\Omega$ ]
L	2.5 [ $mH$ ]
C	0.16 [ $\mu F$ ]
$L_s$	7.5 [ $H$ ]
f	50 [ $Hz$ ]
$ e_{\alpha\beta} $	155.5635 [ $V$ ]

Tabla 4.2: Parámetros del transformador y la red

Es de notar que tanto los parámetros del controlador como los parámetros del transformador permanecen constantes para los tres escenarios propuestos.

#### 4.1.1. Escenario I

Para el Escenario I se seleccionaron referencias arbitrarias para potencia activa y reactiva, como se muestra en la tabla 4.3.

Parámetro	Valor	$t_i$ [s]	$t_f$ [s]
$P_{ac}^{ref}$	0	0	1
	4	1	3
	-5	3	5
	2	5	7
	-3	7	9
	0	9	10
$Q_{ac}^{ref}$	0	0	2
	6	2	4
	-3	4	6
	2	6	8
	-5	8	9
	0	9	10

Tabla 4.3: Parámetros de potencia activa y reactiva de referencia

La figura 4.1 muestra la respuesta dinámica de la corriente del superconductor  $i_{dc}$  cuando se utiliza un sistema SMES para controlar la potencia activa y reactiva de forma independiente lo cual también se utiliza en los sistemas SMES como un reactor variable con la capacidad de funcionar como un inductor o condensador de acuerdo con los requisitos eléctricos de la red de AC.

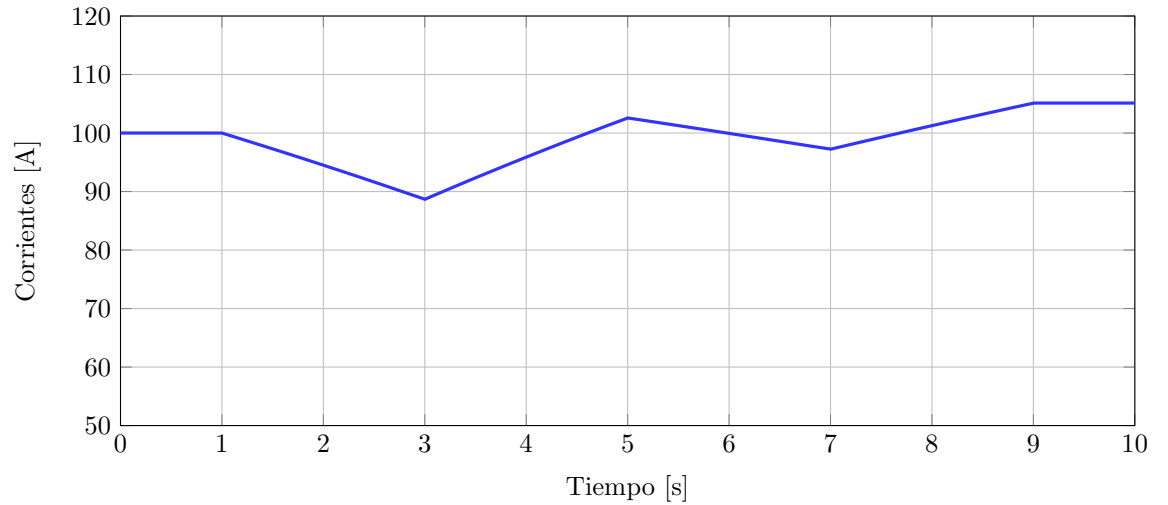


Figura 4.1: Corriente del superconductor

La figura 4.2 representa la corriente de la red la cual depende de la potencia activa y reactiva del sistema a menudo que esta aumenta la corriente aumenta y viceversa.

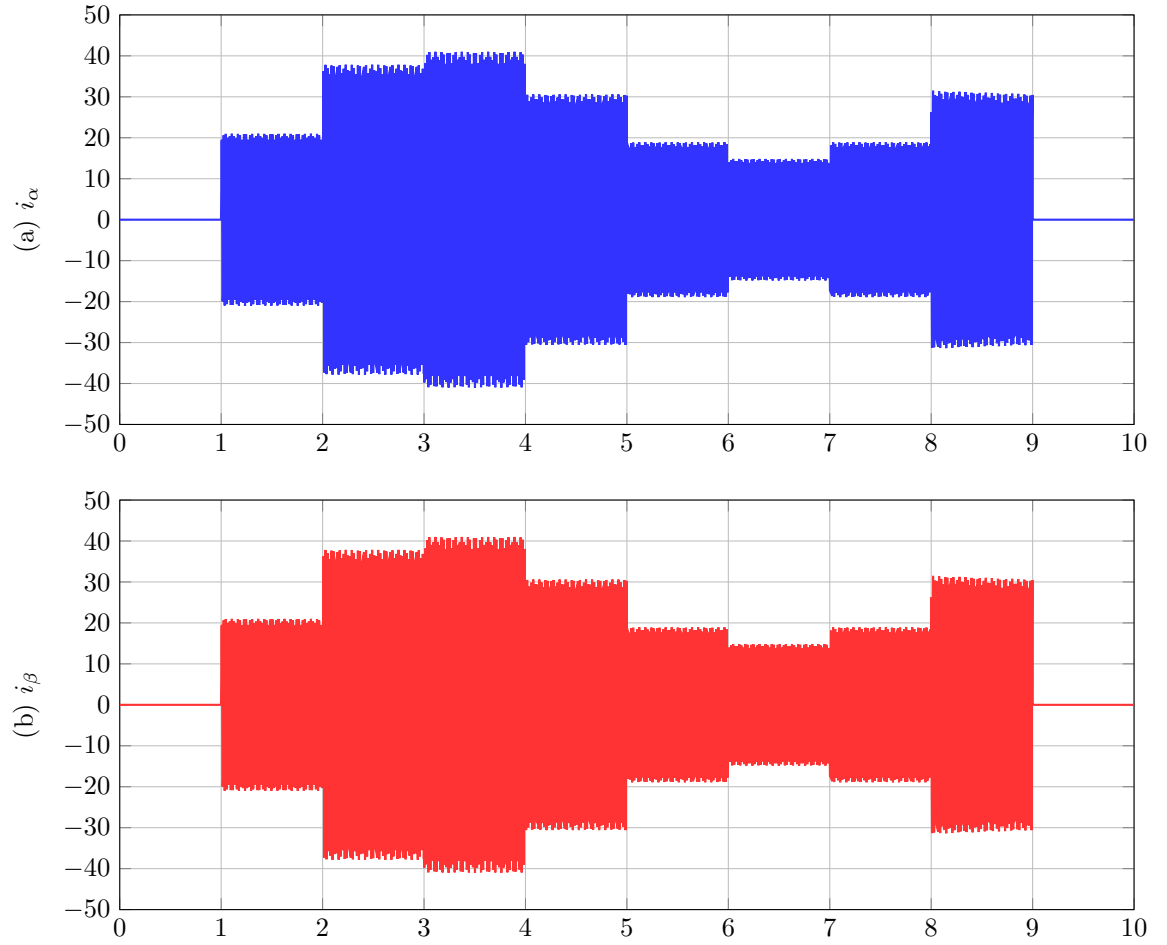


Figura 4.2: Corrientes del sistema

La figura 4.3 muestra la respuesta dinámica del sistema donde el control de potencia activa y reactiva,  $P_{ac}$  y  $Q_{ac}$  siguen las referencias  $P^{rac}$  y  $Q^{rac}$  lo cual nos demuestra la resistencia y la eficiencia del control propuesto.

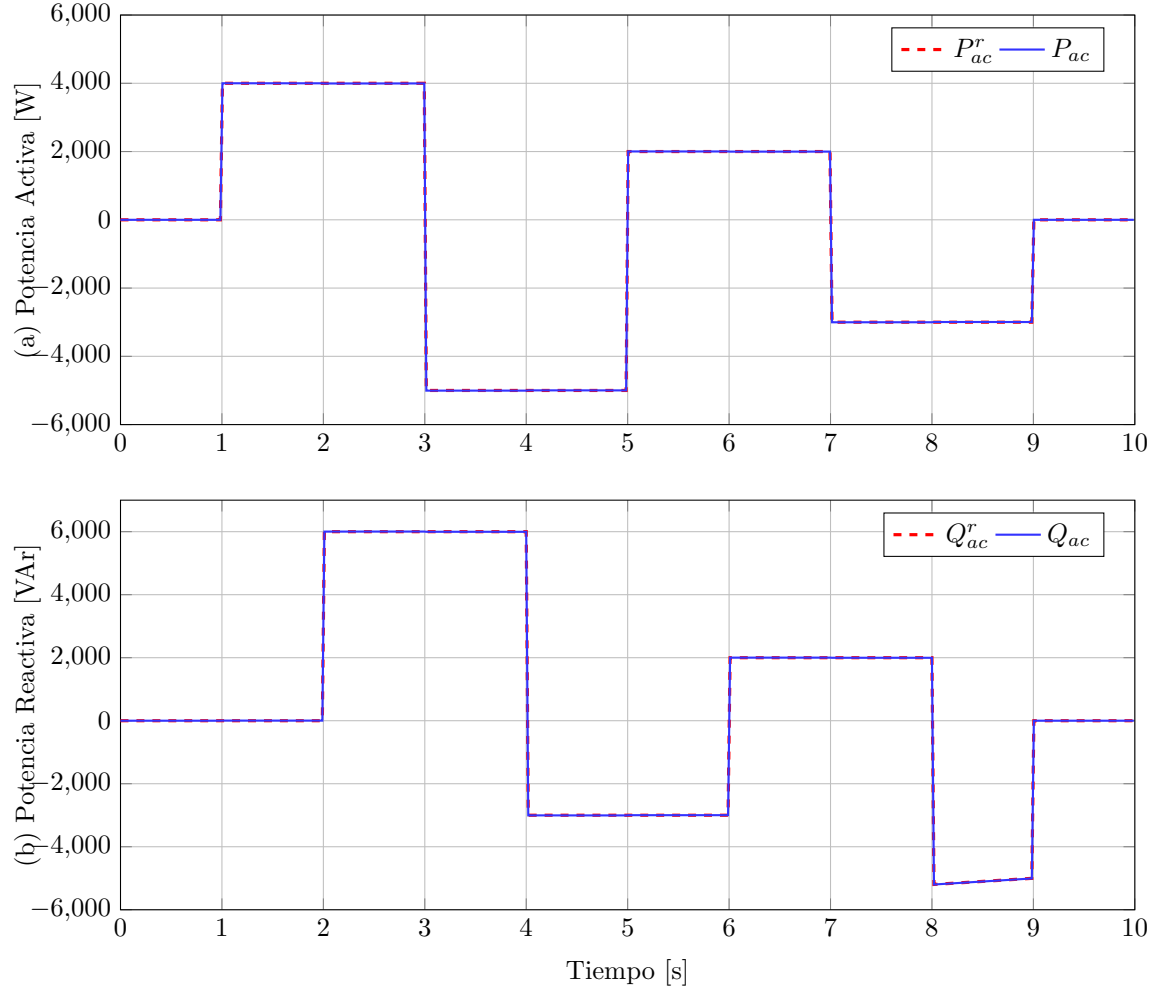
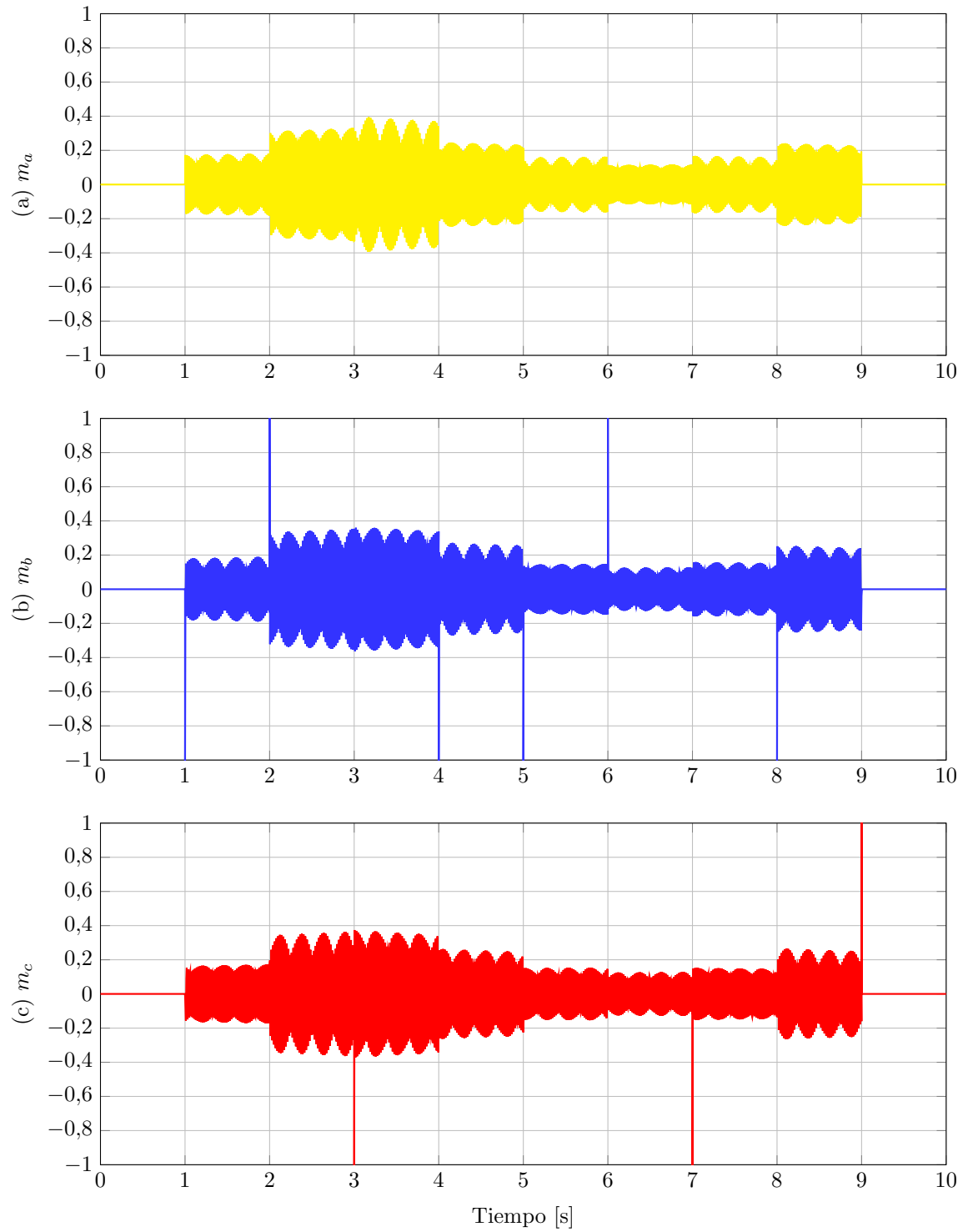


Figura 4.3: Respuesta dinámica del control de potencia activa y reactiva en el sistema SMES bajo condiciones de equilibrio

En la figura 4.4 se presentan los índices de modulación  $ma$ ,  $mb$  y  $mc$ , que presentan las oscilaciones causadas por la amplificación de la tensión de desequilibrio en el filtro capacitivo. Además, los índices de modulación presentan algunos puntos de saturación y ruido que son características comunes del PWM-CSC.



Figura 4.4: Índices de modulación  $m_a$ ,  $m_b$  y  $m_c$

### 4.1.2. Escenario II

Para el Escenario II se consideraron las referencias de energía tanto activas como reactivas utilizadas en el primer sistema; Además, se considera que el sistema tiene un desequilibrio del 10 % en cada fase como se muestra en la tabla 4.4;

Parámetro	valor
$ ea(t) $	$vrms_{LL}$
$ eb(t) $	$0.9 \text{ } vrms_{LL}$
$ ec(t) $	$1.1 \text{ } vrms_{LL}$

Tabla 4.4: Parámetros de desequilibrio

La figura 4.5 muestra la respuesta dinámica de la corriente del superconductor  $i_{dc}$  cuando se utiliza un sistema SMES para controlar la potencia activa y reactiva de forma independiente.

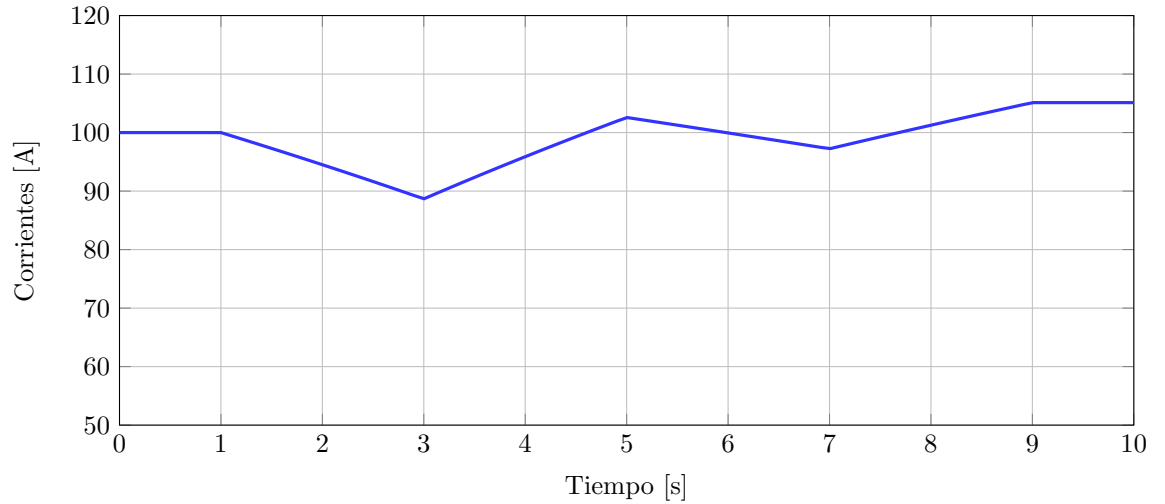


Figura 4.5: Corriente superconductor

La figura 4.6 demuestra el cambio de amplitud de la potencia activa y reactiva, ya que a menudo que la potencia aumenta la corriente también aumenta o viceversa.

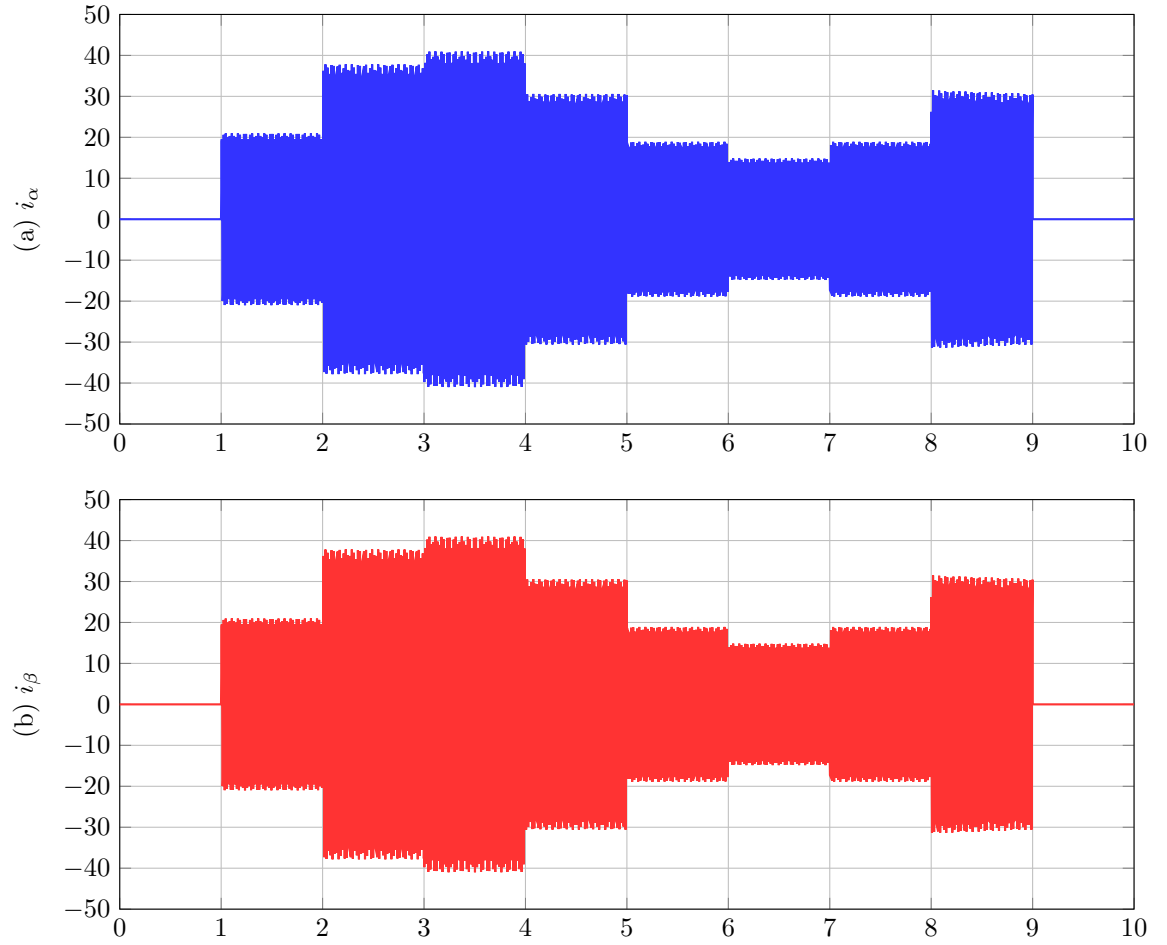


Figura 4.6: Corrientes del sistema

La figura 4.7 muestra el control de potencia activa y reactiva,  $P_{ac}$  y  $Q_{ac}$  siguen las referencias  $P^{rac}$  y  $Q^{rac}$  sin importar el desequilibrio lo cual nos demuestra la resistencia y la eficiencia del control propuesto.

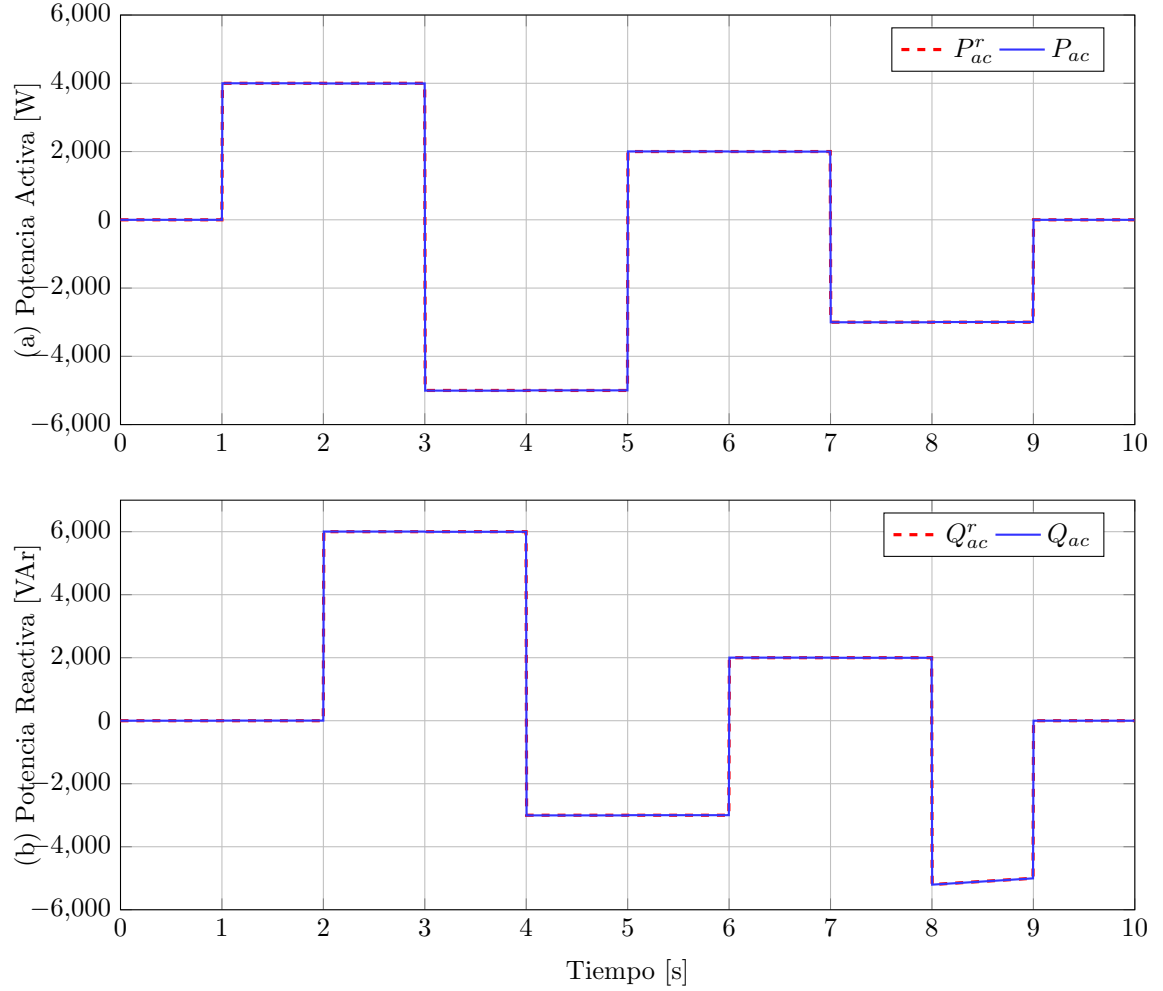


Figura 4.7: Respuesta dinámica del control de potencia activa y reactiva en el sistema SMES bajo condiciones de desequilibrio

Finalmente en la figura 4.8 se presentan los índices de modulación  $m_a$ ,  $m_b$  y  $m_c$ , que presentan las oscilaciones causadas por la amplificación de la tensión de desequilibrio en el filtro capacitivo. Además, los índices de modulación presentan algunos puntos de saturación y ruido que son características comunes del PWMCS. Sin embargo, no representan ningún problema menor al funcionamiento normal del sistema SMES.

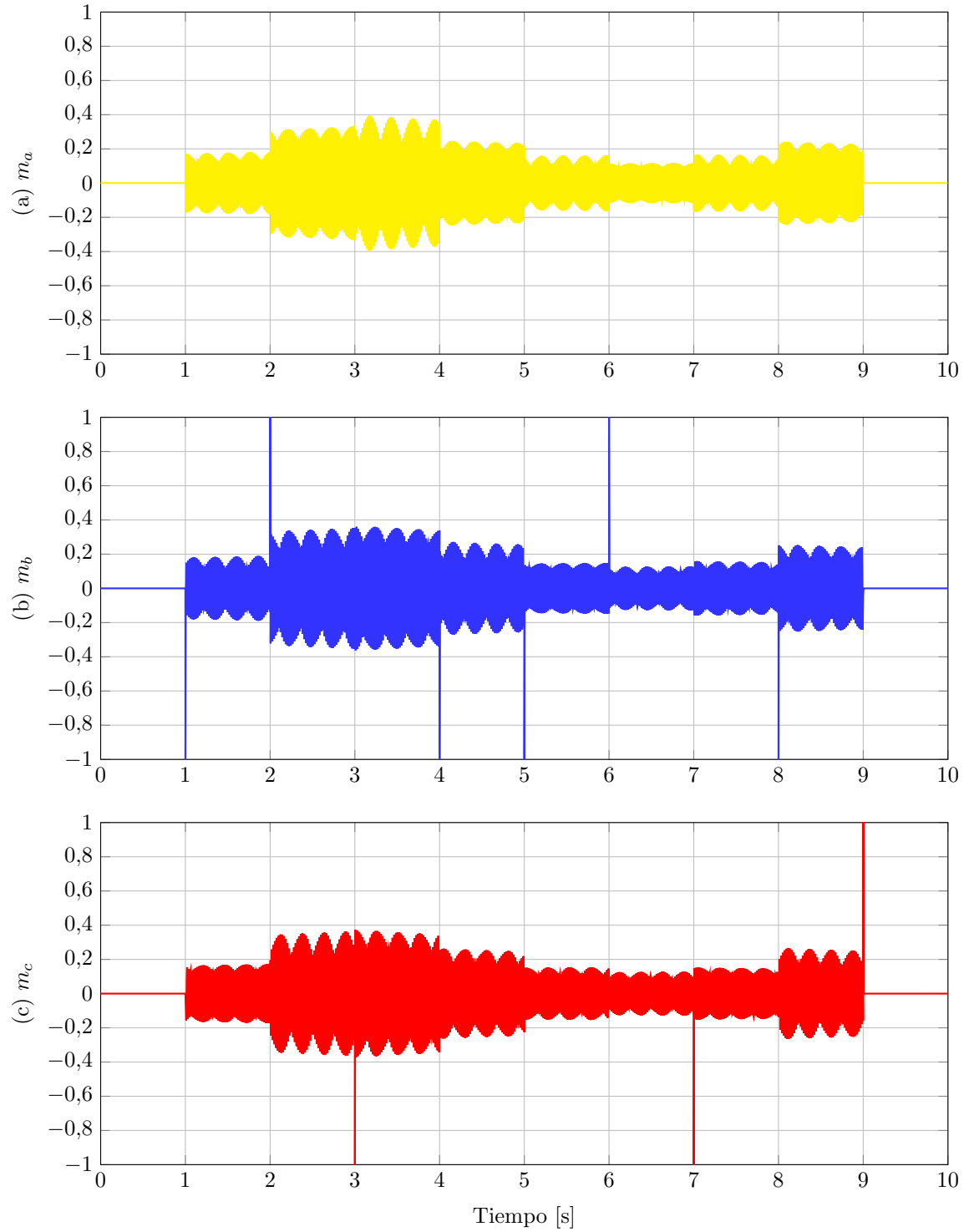


Figura 4.8: Índices de modulación  $m_a$ ,  $m_b$  y  $m_c$  en condiciones de desequilibrio

### 4.1.3. Escenario III

Para el Escenario III mostrado en la figura 4.9 se utiliza los dispositivos de almacenamiento de energía para apoyar la energía activa y reactiva en aplicaciones de generación distribuida; para este caso se considerará que como fuente de energía renovable un generador eólico donde la corriente proveniente de la micro-red, se modela teniendo en cuenta una curva de la variación de la velocidad del viento, en este caso el flujo de potencia activa es unidireccional, va desde la fuente de energía renovable hacia la red de distribución; por lo tanto el sistema SMES ayudara al generador eólico a despachar la demanda de la red de distribución.

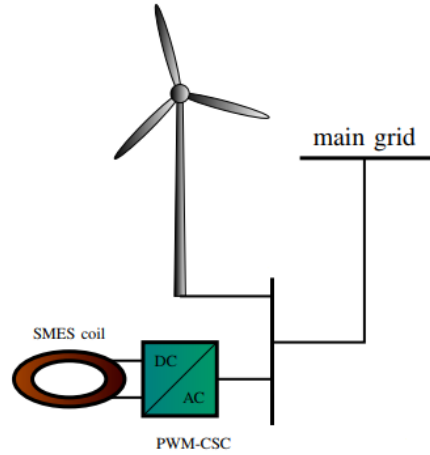


Figura 4.9: Sistema SMES propuesto con un generador eólico

la figura 4.10 representa la corriente del superconductor  $i_{dc}$  cuando se utiliza el SMES para controlar la potencia activa y reactiva de forma independiente.

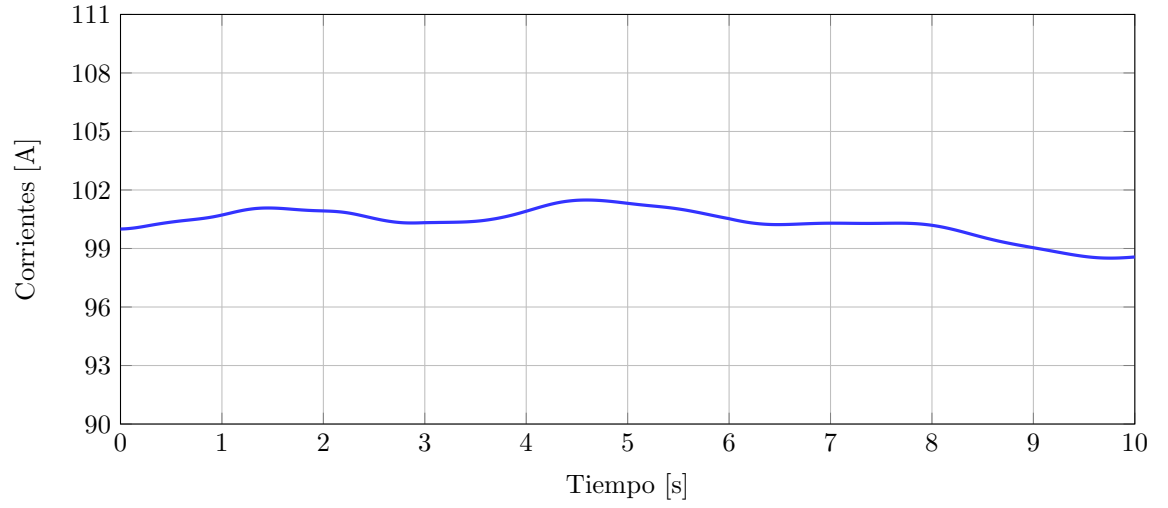


Figura 4.10: Corriente del superconductor

la figura 4.11 muestra el error porcentual de la corriente de la red.

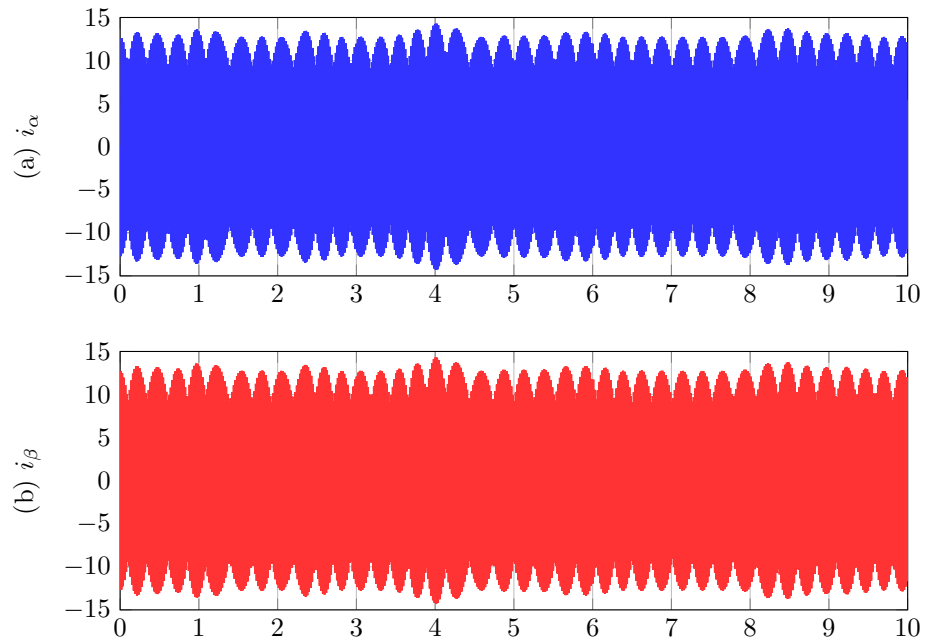


Figura 4.11: Corriente de la red

En las figuras 4.12 se muestra la respuesta dinámica del control de potencia activa y reactiva en el sistema, el cual muestra la compensacion de la energía activa y reactiva para apoyar el generador eólico.

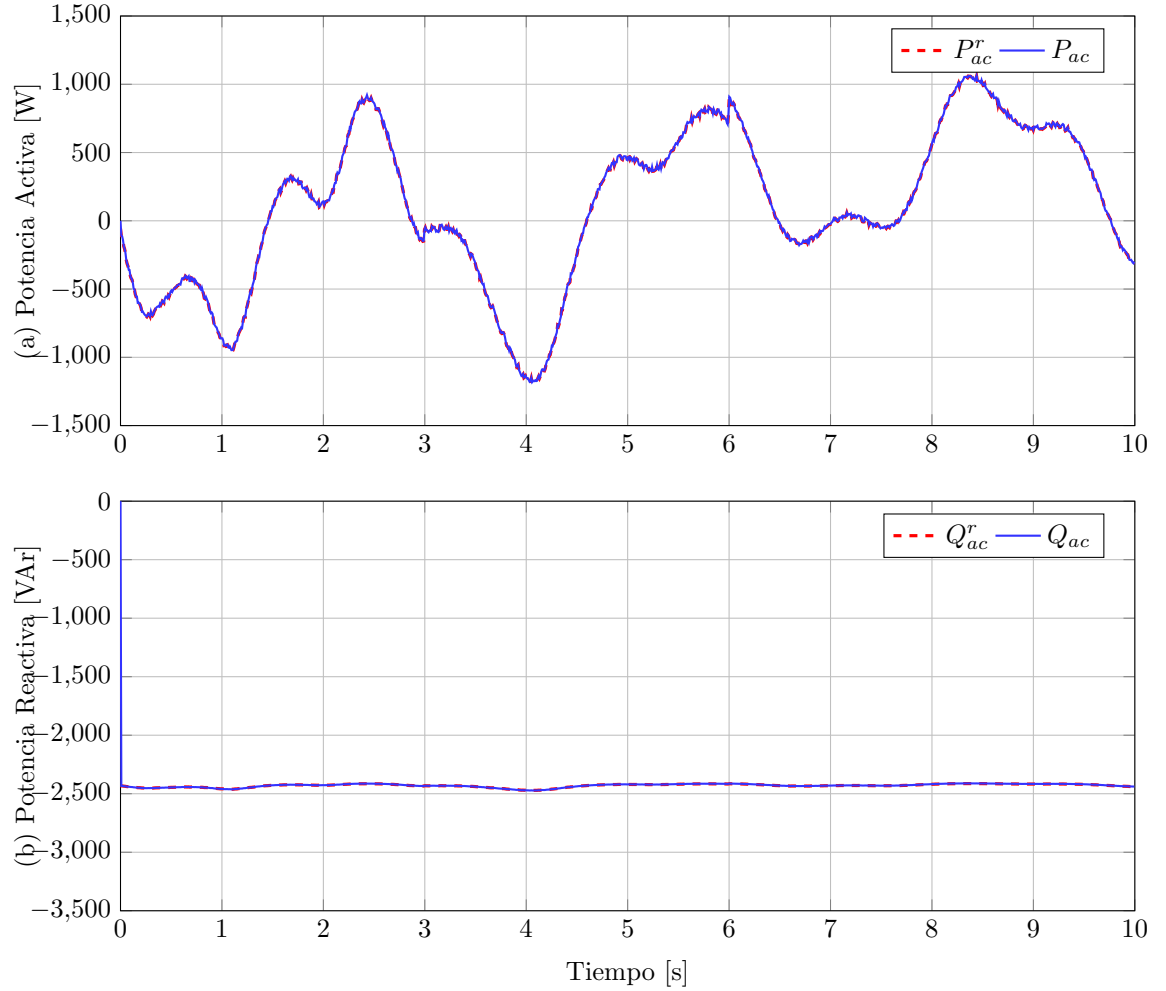


Figura 4.12: Curva de generación de la potencia activa y el consumo de potencia reactiva activa del SMES

En la figura 4.13 se presenta los índices de modulación  $ma$ ,  $mb$  y  $mc$  lo cual nos demuestra el ángulo de operación del sistema donde se mantiene en  $\pm 1$ .



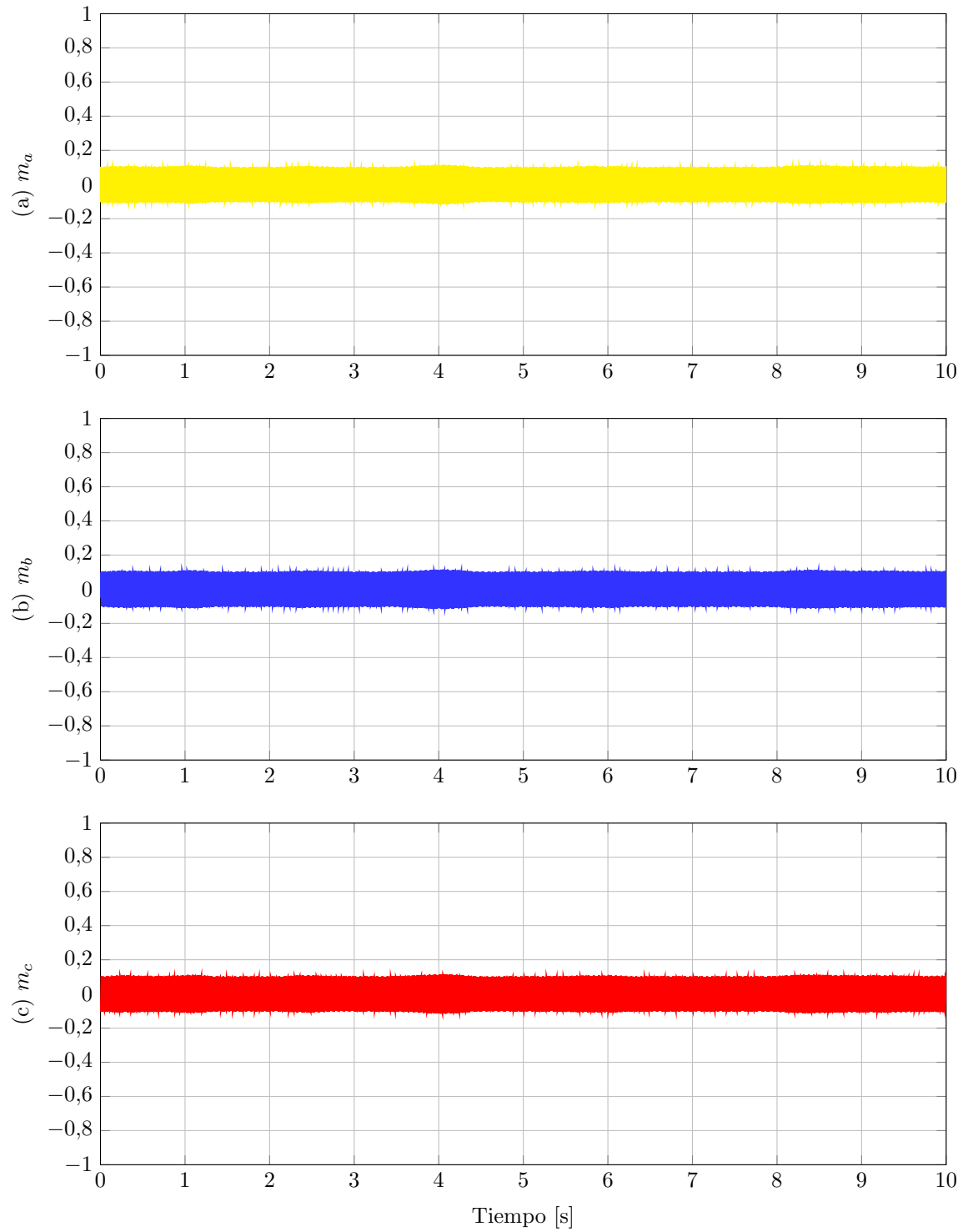


Figura 4.13: Índices de modulación

## Capítulo 5

### Conclusiones

Se desarrolló un modelo matemático para el control no lineal de un almacenador de energía por superconducción para el soporte de potencia activa y reactiva en sistemas de distribución. Se empleó un enfoque proporcionales-integrales convencional bajo una formulación basada en pasividad para obtener una ley de control general considerando las características intrínsecas Hamiltonianas; Esta técnica de control garantizó la estabilidad en el control de lazo cerrado a través de la teoría de Lyapunov.

La estrategia del control propuesto demostró la capacidad para compensar la potencia activa y reactiva en los sistemas de distribución considerando el equilibrio, desequilibrio y la conexión de un sistema de generación distribuida.

Se observó que el sistema de control diseñado responde de manera satisfactoria llevando los variables de control a las referencia deseados con tiempos alrededor de 0,02 segundos.

# Bibliografía

- [1] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,” *Applied energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [2] W. Gil-González, O. D. Montoya, A. Garcés, and G. Espinosa-Pérez, “IDA-Passivity-Based Control for Superconducting Magnetic Energy Storage with PWM-CSC,” in *2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, March 2017, pp. 89–95.
- [3] M. H. Ali, B. Wu, and R. A. Dougal, “An overview of SMES applications in power and energy systems,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 38–47, 2010.
- [4] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, “Comparison and analysis of different energy storage techniques based on their performance index,” in *2007 IEEE Canada Electrical Power Conference*. IEEE, 2007, pp. 393–398.
- [5] D. S. Padimiti and B. H. Chowdhury, “Superconducting magnetic energy storage system (SMES) for improved dynamic system performance,” in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*. IEEE, 2007, pp. 1–6.
- [6] W. Gil-González, O. Montoya, A. Garcés, and A. Escobar-Mejía, “Supervisory LMI-based state-feedback control for current source power conditioning of SMES,” in *Green Technologies Conference (GreenTech), 2017 Ninth Annual IEEE*. IEEE, 2017, pp. 145–150.
- [7] A. Ortega and F. Milano, “Generalized model of VSC-based energy storage systems for transient stability analysis,” *IEEE transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3369–3380, 2016.
- [8] O. Montoya, W. Gil-González, and F. Serra, “PBC Approach for SMES Devices in Electric Distribution Networks,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2018.
- [9] A. M. Hernandez and H. L. Reyes, “Behavior of Fuels Supply Variable Costs in Electrical Energy Generation using Gas and Coal,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 2915–2921, 2015.
- [10] O. D. Montoya, A. Grajales, A. Garcés, and C. A. Castro, “Distribution systems operation considering energy storage devices and distributed generation,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 5, pp. 890–900, 2017.

- [11] J. Shi, Y. Tang, L. Ren, J. Li, and S. Cheng, “Discretization-based decoupled state-feedback control for current source power conditioning system of SMES,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2097–2104, 2008.
- [12] W. Gil-González, O. D. Montoya, A. Garcés, and A. Escobar-Mejía, “Supervisory LMI-Based State-Feedback Control for Current Source Power Conditioning of SMES,” in *2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, March 2017, pp. 145–150.
- [13] O. D. Montoya, W. Gil-González, A. Garcés, and G. Espinosa-Pérez, “Indirect IDA-PBC for active and reactive power support in distribution networks using SMES systems with PWM-CSC,” *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 261–271, 2018.
- [14] L. F. Grisales, A. Grajales, O. D. Montoya, R. A. Hincapié, M. Granada, and C. A. Castro, “Optimal location, sizing and operation of energy storage in distribution systems using multi-objective approach,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 6, pp. 1084–1090, 2017.
- [15] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, “Control of power converters in AC microgrids,” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.
- [16] X. Y. Chen, J. X. Jin, Y. Xin, B. Shu, C. L. Tang, Y. P. Zhu, and R. M. Sun, “Integrated SMES technology for modern power system and future smart grid,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 5, p. 3801605, 2014.
- [17] W. J. Gil-González, A. Garcés, and A. Escobar, “A generalized model and control for supermagnetic and supercapacitor energy storage,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 13, no. 26, pp. 147–171, 2017.
- [18] W. Gil-González and O. D. Montoya, “Passivity-based PI control of a SMES system to support power in electrical grids: A bilinear approach,” *Journal of Energy Storage*, vol. 18, pp. 459–466, 2018.
- [19] S. P. Nagesh Rao, G. A. D. Lopes, D. Jeltsema, and R. Babuška, “Port-Hamiltonian Systems in Adaptive and Learning Control: A Survey,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 61, no. 5, pp. 1223–1238, May 2016.
- [20] S. P. Nagesh Rao, G. A. Lopes, D. Jeltsema, R. Babuska *et al.*, “Port-Hamiltonian Systems in Adaptive and Learning Control: A Survey,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 61, no. 5, pp. 1223–1238, 2016.